

基于谐振的光压测量

刘泽刚¹, 黄耿石¹, 李振柱¹, 吴泽宏¹,
林美玉¹, 吴泳波^{1,2,3}, 唐志列^{1,2,3}

(1. 华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006;
2. 广东省光电检测仪器工程技术研究中心, 广东 广州 510006;
3. 广东省量子调控工程与材料重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要:在扭秤的基础上, 提出结合机械共振、光杠杆和电磁阻尼的光压测量方法. 在大气环境中, 测量激光对镜片作用的平行分力, 忽略垂直镜片的分力, 从而将光压与辐射效应错开, 无需真空处理. 采用调制光驱动扭秤, 使其发生共振, 并通过测量扭秤的振动幅度, 得到光压的大小. 实验结果表明: 采用该方法测得激光器在 45° 入射、功率为 70 mW 时, 产生光压为 4.2×10^{-5} Pa. 对共振曲线进行频谱分析及光压测量值评估, 证实实验结果可靠.

关键词:光压; 机械共振; 扭秤; 辐射效应

中图分类号: O348.1 文献标识码: A 文献编码: 1005-4642(2017)01-0001-06

光压, 即光对物体表面的压强大小, 最早由麦克斯韦提出^[1-2]. 光入射到物体表面时, 会产生聚热效果, 加剧气体分子对物体表面的作用, 导致除了光压作用外, 还存在克鲁克斯辐射效应^[3]. 辐射效应导致光压测量极其困难. 并且, 光压极其微弱, 比如太阳垂直辐射地球表面的压强大约只有 4.5×10^{-6} Pa^[4]. 最早可追溯到列别捷夫的光压实验^[4-5]. 利用扭秤偏转测量光压大小, 采用高真空处理, 避免了辐射效应的影响. 由于当时真空处理技术和光源条件的限制, 容器利用水银蒸气连续几天抽气, 光源采用大功率弧光灯, 存在发热、光强偶然起伏、方向性差问题. 实验采取水滤红外线、透镜反射镜聚焦反射及温差电堆等措施, 实验处理繁琐. 现今, 光压测量方法也并不多, 主要采用光干涉、扭秤偏转和压电效应等三大类方法. 如干涉法光压演示装置^[6], 该实验装置不能消除热辐射效应的影响和精确测量光压大小, 只能作为光压演示实验. 压电陶瓷光电转换^[7]将光作用于压电陶瓷, 进行电信号放大, 得出光压大小与电信号的关系, 可测得 10^{-6} N 的弱力, 为了避免辐射效应的影响, 压电陶瓷接收面也处于高真

空环境. 马赫-曾德尔干涉装置^[8]利用双角度入射方法消除了热辐射效应的影响, 可在低真空中进行测量, 测得光功率为 15.0 mW 所产生的光压大小为 13.42 μ Pa.

本文在扭秤的基础上, 结合机械共振、光杠杆和电磁阻尼, 实现了光压的测量. 机械共振, 即以正弦调制光驱动扭秤, 当调制光强变化频率与扭秤固有频率一致时, 扭秤才有较大幅度偏转, 且比传统扭秤偏转大 20~30 倍. 这使得扭秤对光压弱力有敏感响应, 而对无规律的噪声感应小. 另外, 本实验无需真空处理. 自行设计激光调控电路, 光强正弦变化, 幅值可调, 周期长, 对镜片聚热效果小; 激光斜入射镜片, 测量光对镜片的平行分力, 垂直镜片的分力不进行测量, 从而将光压与辐射效应错开. 对实验结果做频谱分析与数值评估, 证实了该方法的可行性, 可作为光压简易演示和测量.

1 理论分析

扭秤对弱力具有高的敏感性. 扭秤机械共振法, 即通过周期力矩驱动扭秤和适当调节实验条

收稿日期: 2016-04-24; 修改日期: 2016-05-23

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61575067); 广东省自然科学基金 (No. S2013020012810); 华南师范大学青年教师科研培育基金 (No. 2012KJ010)

作者简介: 刘泽刚 (1994-), 男, 广东潮州人, 华南师范大学物理与电信工程学院 2013 级本科生.

指导教师: 吴泳波 (1984-), 男, 广东揭阳人, 华南师范大学物理与电信工程学院实验师, 硕士, 主要从事光电检测技术、光声共焦显微成像技术研究.



件,而使扭秤达到共振状态的弱力累加效应测量方法.该思想在万有引力常量 G 的测量方面^[9-11]得到广泛的应用,也曾被用于微弱电量的测量^[12].对于光压微小量,在机械共振下,扭秤同样具有高的敏感性.

若无光压的作用,扭秤只受到悬线扭转力矩、空气阻尼作用,则作衰减振动,运动方程为

$$I\ddot{\theta} + 2\gamma\dot{\theta} + k\theta = 0, \quad (1)$$

其解为

$$\theta = B \exp\left[-\frac{\gamma}{I}t\right] \cos(\omega't + \varphi'), \quad (2)$$

$$\omega' = \sqrt{\frac{k}{I} - \frac{\gamma^2}{I^2}} = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{I^2}} = \frac{2\pi}{T}, \quad (3)$$

式中, γ 为空气的阻尼系数, T 为衰减周期, I 为扭秤的转动惯量, k 为扭丝的扭转弹性系数, $\omega_0 = \sqrt{k/I}$ 为扭秤的本征角频率. 记初始时刻为 t_0 , 其振幅为

$$B_0 = B \exp\left[-\frac{\gamma}{I}t_0\right],$$

经过 n 个周期 T 后, 其振幅为

$$B_{nT} = B \exp\left[-\frac{\gamma}{I}(t_0 + nT)\right],$$

得

$$\frac{B_0}{B_{nT}} = \frac{B \exp\left[-\frac{\gamma}{I}t_0\right]}{B \exp\left[-\frac{\gamma}{I}(t_0 + nT)\right]},$$

化简得

$$\gamma = \frac{I}{nT} \ln\left[\frac{B_0}{B_{nT}}\right].$$

如图 1 所示, 若在光压周期力矩驱动下, 2 束调制激光以正弦光强斜入射镜片, 亮暗交替变化. 光压作用可分解为垂直镜片的分力和平行镜片的分力. 由于辐射效应主要在垂直镜片方向上, 实

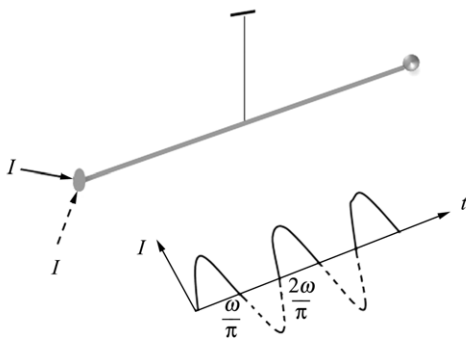


图 1 扭秤周期力矩驱动图

验中只对平行镜片的分力进行测量, 不进行垂直镜片的分力测量, 使光压与辐射效应错开. 所以, 2 束调制激光以正弦光强斜入射镜片, 等效于正弦力矩 $Fd \sin(\omega t)$ 作用镜片于平行方向上. F 为最大光强时平行镜片的分力, 即实验所要测量的光压力; ω 为调制光的光强变化角频率, 即正弦力矩的角频率; d 为扭秤的长度的一半, 即光压对扭秤的动力臂. 则扭秤的运动方程为

$$I\ddot{\theta} = -2\gamma\dot{\theta} - k\theta + Fd \sin(\omega t), \quad (4)$$

其解为

$$\theta = B \exp\left[-\frac{\gamma}{I}t\right] \cos(\omega't + \varphi') + A \sin(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

其中

$$A = \frac{Fd}{\sqrt{(k - I\omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2}} = \frac{Fd}{\sqrt{(I\omega_0^2 - I\omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2}}. \quad (6)$$

(5) 式中的第一项随时间指数衰减, 第二项保持简谐振动. 经过一段时间后, 第一项趋向于 0, 可忽略, 扭秤将以振幅 A 做简谐振动. 当角频率满足

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \frac{2\gamma^2}{I^2}, \quad (7)$$

A 取得最大值

$$A_{\max} = \frac{Fd}{2\gamma \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{I^2}}},$$

此时称为机械共振^[9-11], 即

$$F = \frac{2\gamma A_{\max} \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{I^2}}}{d}.$$

而 ω_0 满足式(3), 所以通过测量无光压作用下扭转的衰减振动曲线, 得出衰减周期 T 、阻力系数 γ 、转动惯量 I , 从而计算出共振所需的角频率 ω . 再调制激光以角频率 ω 驱动扭秤, 使其共振, 测量 A_{\max} , 得出光压 F 大小.

2 实验装置设计

如图 2 所示, 扭线采用直径 0.025 mm、长 18.95 cm 的钨丝^[11,13](高 Q 值, 降低热噪声); 悬杆为直径 2 mm、长 10 cm 的石英玻璃棒. 玻璃棒一端是高反射率铝膜的反射镜 M_1 , 直径 4 mm, 镜片 M_1 与玻璃棒垂直; 另一端是金属小球, 玻璃棒中间安装反射镜 M_2 ; 扭秤下面是电磁阻尼装

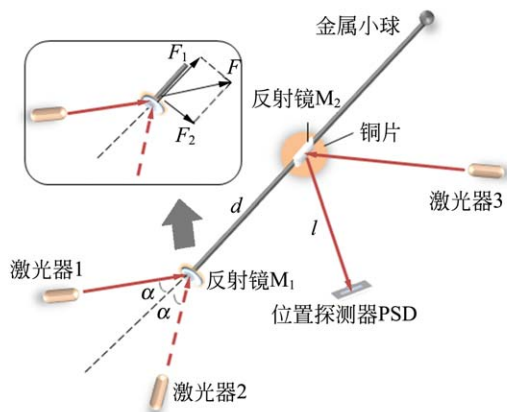


图 2 实验装置俯视图

置,由薄铜片和永磁体组成,可在不影响扭秤正常扭转的情况下,阻碍相对运动,减少实验误差并提高实验的稳定^[12]。

产生光压的 2 台激光器 1 和 2 在同一水平面内以相同入射角 α ,各从两边斜入射镜片 M_1 (图 2)。光压作用可以分解为垂直镜片的分力 F_1 和平行镜片的分力 F_2 ,实验中只对 F_2 进行测量。激光器 1 以半个周期 π/ω (如图 1)的正弦光强斜入射镜片,接着,激光器 2 以半个周期 π/ω 的正弦光强斜入射镜片。2 束激光如此交替地入射镜片,使扭秤在平行镜片的方向上受到正弦力矩 $Fdsin(\omega t)$ 驱动。若激光变化频率 ω 与扭秤固有频率一致[即式(7)],则扭秤发生共振,根据共振幅度可得光压大小。

激光调控电路由增益放大模块 AD835、主控芯片 STM32F103VCT6 和功率驱动模块 buf634 组成,可调控激光正弦电流的幅值与周期。扭秤振幅 A_{max} 通过光杠杆放大,由 PSD 探测器^[14-16]测量。高准直半导体激光入射镜片 M_2 ,反射点被 PSD 接收。PSD 电路由电流电压转换电路、电压增益放大模块、ADC 模块采集、主控芯片 STC89C52RC 组成。将采集到的数据传到 PC 端进行处理与同步显示。

实验在密封的玻璃罩内进行,实验并未采取真空措施,采用以下措施来避免辐射效应:

1)自行设计激光调控电路,光强正弦变化,幅值可调,一方面对镜片聚热效果小,另一方面可探究寻找出合适的幅值,使得辐射效应不明显且扭秤对噪声不敏感;

2)激光斜入射镜片,只测量光对镜片的平行

分力,从而将光压与辐射效应错开;

3)共振法的品质因数很高^[9],使扭秤频率响应的带宽很窄,说明扭秤对周围的噪声不敏感,较小的光压可得到较大的信号响应;

4)采用高反射率铝膜的反射镜,进一步降低聚热效果。

3 实验结果

3.1 激光器正弦光强的实现

利用恒流源和光强探测器对产生光压的 2 台激光器 1 和 2 的驱动电流与对应的光强进行测量,如图 3 所示。

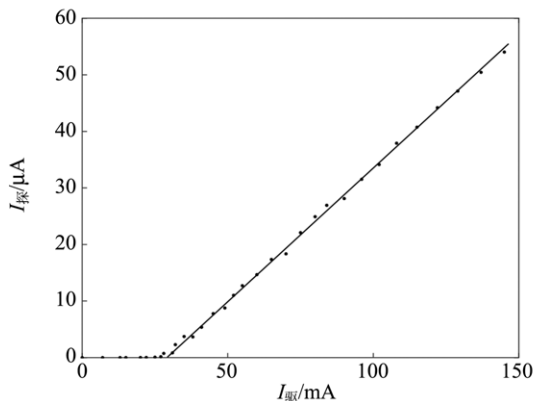


图 3 激光器驱动电流与光强关系图

激光器需要一定的电流值才能被驱动,驱动后光强与驱动电流呈线性关系。所以设计电路产生具有向上偏置的正弦电流,偏置值、正弦电流幅值以及周期可调。偏置值对应激光器驱动的最小电流,实验中调节偏置值使激光器刚开始发出微弱的光即可。正弦电流使激光的光强正弦变化,实验测量结果如图 4 所示。该实验激光器电流幅

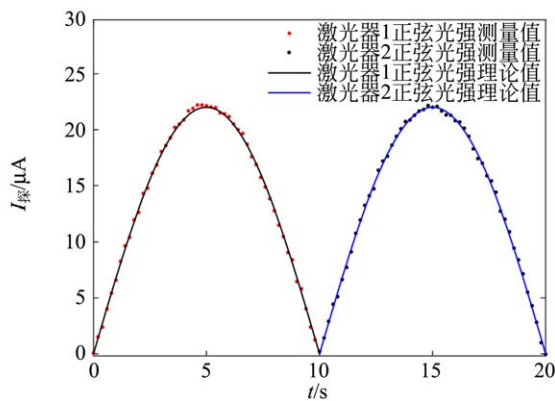


图 4 激光器正弦光强验证图

值 70 mA, 周期 20 s, 光强测量结果与理论符合, 呈正弦变化.

3.2 无光压作用下扭秤衰减振动测量

空气阻尼下, 扭秤以 $\exp\left(-\frac{\gamma t}{I}\right)$ 衰减因子余弦振动, 扭秤振动通过光点的移动测量. 扭秤振幅 $B = \frac{X}{2l}$, X 为 PSD 上光点的振动幅值, x 为 PSD 上光点的位置坐标, l 为扭秤上的反射镜 M_2 到 PSD 的距离, 实验过程中 $l = 25$ cm, 位置坐标 x 可以精确到 0.1 mm. 通过光杠杆放大和 PSD 探测器测量, 可以得到光点的移动曲线, 结果如图 5 所示.

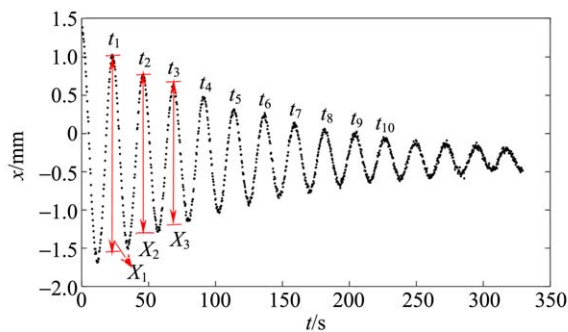


图 5 空气阻尼下扭秤衰减振动曲线图

通过测量扭秤的长度、内径及质量, 计算得转动惯量 $I = 1.5 \times 10^{-6}$ kg · m²; 空气阻力系数由

$$\gamma_i = \frac{I}{t_{i+5} - t_i} \ln \left(\frac{X_i}{X_{i+5}} \right), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \quad \text{得 } \bar{\gamma} =$$

1.1×10^{-8} kg · m² · s⁻¹; 采用逐差法得到衰减周期 $T = 22.6$ s; 再由式(3)和式(7)得扭秤的本征角频率 $\omega_0 = 0.278$ s⁻¹, 共振所需的激光角频率

$\omega = 0.278$ s⁻¹, 即激光的周期为 $\frac{2\pi}{\omega} = 22.6$ s.

3.3 光压作用下扭秤共振周期的实验验证

由衰减曲线推出共振周期为 22.6 s, 接下来对其实验验证. 激光电流幅值调为 70 mA, 入射角固定为 45°. 改变激光的周期(即调节角频率 ω), 测得每个周期下扭秤振动幅值(光点幅值), 如图 6 所示. 从图 6 可以看出实验值周期 22.8 s 下, 扭秤达到最大幅度 1.30 mm; 理论值 22.6 s 下振动也极大, 达到 1.15 mm, 在一定误差内, 可用理论值代替实验值. 图 6 中曲线的峰较尖, 说明扭秤品质因数较高, 只有共振频率才会对扭秤产生较大影响, 噪声对扭秤影响小.

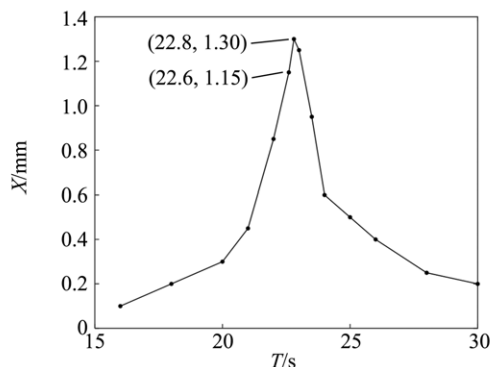


图 6 扭秤振幅与周期关系图

3.4 光压测量

在共振周期 $T = 22.8$ s 下, 调节激光正弦电流的幅值分别为 50, 60, 70, 80 mA, 入射角分别为 15°, 30°, 45°. 图 7 为某次实验结果. 图 8 为该实验的光压计算结果. 实验中激光器最小电流约 30 mA, 50 mA 下光极弱; 入射角 60° 以上, 激光斜入射反射镜 M_1 的光斑发散严重, 光斑有一部分未落到反射镜 M_1 上.

入射角 15°, 电流幅值 50~80 mA 时, 振动曲线较为杂乱, 不稳定, 幅值小, 只有 0.2~0.4 mm. 入射角 30°, 电流幅值 50 mA 时振动幅值也只有 0.3 mm, 电流幅值 60 mA 和 70 mA 时达到 0.5 mm, 电流幅值 80 mA 时可达 1 mm, 但从长时间(几分钟)来看, 曲线稳定性有一定的起伏. 入射角 45°, 电流幅值 50 mA 时振动幅值 0.5 mm. 电流幅值为 60, 70, 80 mA 时可达 1~2 mm, 比 15° 和 30° 时大 2~3 倍. 从长时间(几分钟)来看, 45°、电流 60~80 mA 的振动曲线较为光滑、稳定, 说明在该范围内光压起主要作用, 辐射效应和噪声较不明显. 这里只是说明 45°、电流 60~80 mA 可作实验, 并不排除其他大于 45° 的入射角也存在合适值. 由于激光斜入射反射镜 M_1 的光斑发散问题, 所以大于 45° 的入射角未进行实验. 所以选取入射角 45°、电流幅值 70 mA、功率约为 70 mW, 对光压进行多次测量, 图 9 为某次测量结果.

对时域曲线进行傅里叶变换, 得到频谱图 10. 峰极尖, 对应的频率为 0.044 9 Hz, 即周期为 22.2 s, 说明在该频率下, 扭秤发生共振, 峰极尖说明扭秤共振幅度大, 对共振频率感应灵敏, 对其他噪声频率不敏感, 噪声对扭秤影响小. 另一方面, 共振周期为 22.2 s, 与之前的实验值 22.8 s

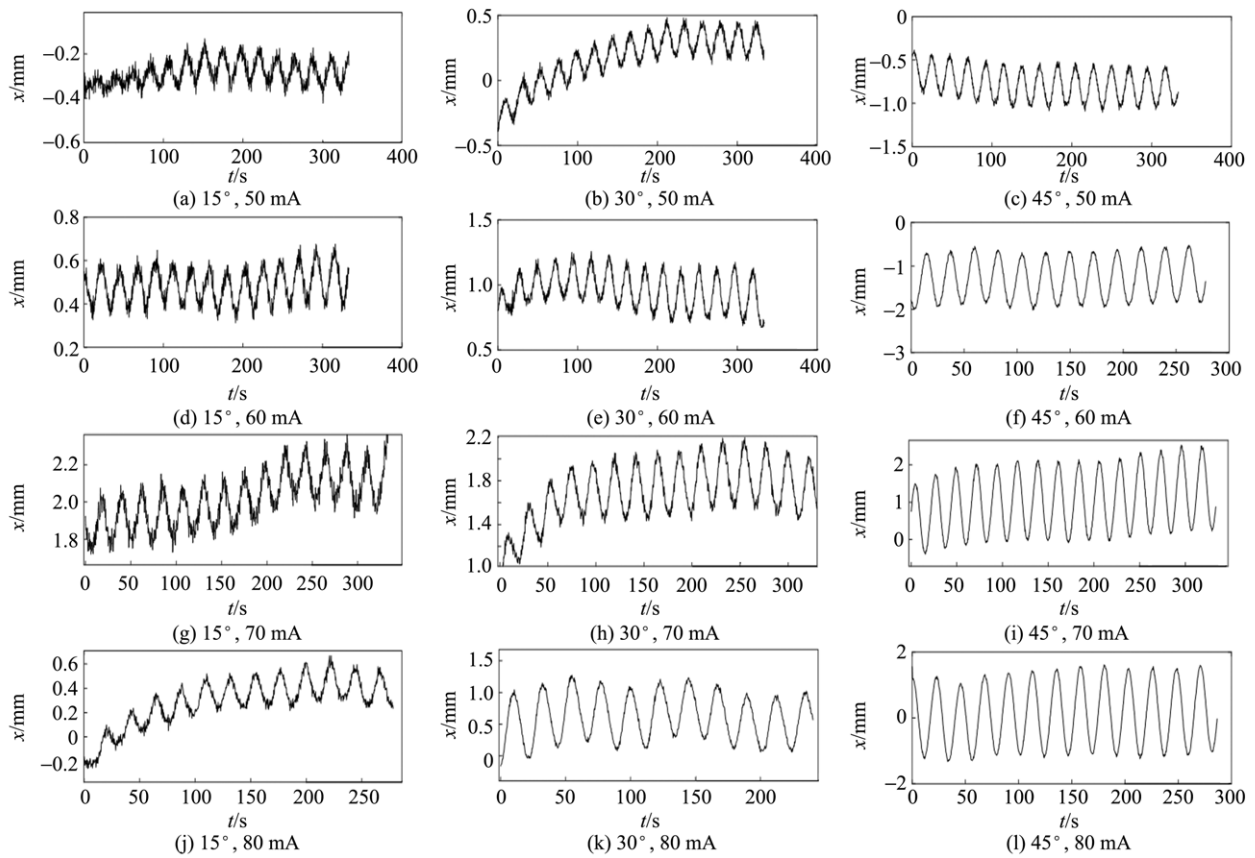


图 7 不同激光入射角和电流幅值下共振曲线

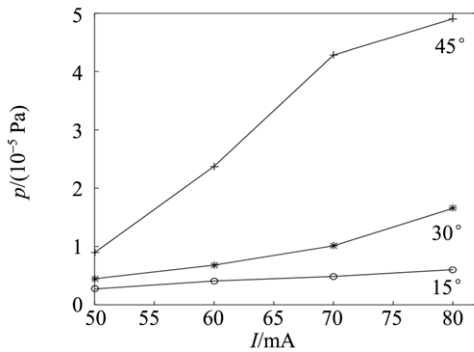


图 8 光压与激光入射角、电流幅值关系图

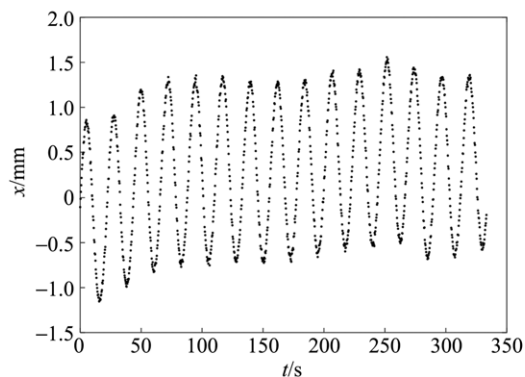


图 9 45°, 70 mA 下扭秤共振曲线图

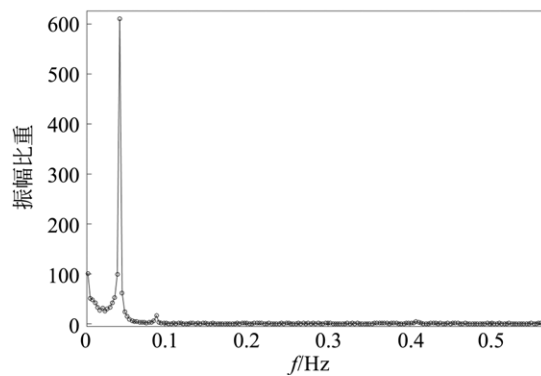


图 10 45°, 70 mA 下扭秤共振曲线频谱图

和理论值 22.6 s 极为接近. 所以在理论值偏差 0.5 s 内, 都可作为共振周期来进行实验.

选取入射角为 45°, 电流幅值为 70 mA, 对光压进行多次测量. 取共振曲线较为稳定的时间区间的振动幅值的平均值作为 X_{\max} ($A_{\max} = X_{\max} / 2l, l = 25 \text{ mm}$), 得到表 1. 得 $\bar{F} = 5.3 \times 10^{-10} \text{ N}$, 计算 \bar{F} 的 A 类不确定度, $u_A = 0.6 \times 10^{-10} \text{ N}$, 所以 $F = (5.3 \pm 0.6) \times 10^{-10} \text{ N}$; 光压 $\bar{p} = \bar{F} / \pi r^2 =$

4.2×10^{-5} Pa, 所以 $p = (4.2 \pm 0.6) \times 10^{-5}$ Pa.

表 1 45° , 70 mA 下扭秤共振幅度数据

实验次数	X_{\max}/mm	$A_{\max}/(10^{-3} \text{ rad})$	$F/(10^{-10} \text{ N})$
1	2.22	4.44	5.4
2	2.29	4.58	5.6
3	2.11	4.22	5.2
4	1.98	3.96	4.8

3.5 光压评估

设单位时间照射到某区域的光子数为 N , 照射面的反射率为 R , 入射角为 α , 则光在单位时间内照射到该区域的动量^[4]为

$$p = \frac{(1+R)Nh\nu}{c}.$$

因为

$$\frac{dp}{dt} = F,$$

故该区域所受到的力^[3]

$$F = \frac{(1+R)Nh\nu}{c},$$

水平方向上的分力

$$F = \frac{(1+R)Nh\nu \sin \alpha}{c}.$$

现该区域取激光照射区域, 则 $Nh\nu$ 为激光功率. 实验中的激光器 70 mA 下功率约为 70 mW, 所以取 $h\nu N = 0.07$ W, $R = 0.9$, $\alpha = \frac{\pi}{4}$, 得 $p = \frac{F}{\pi r^2} = 2.49 \times 10^{-5}$ Pa, 而实验值为 $p = (4.2 \pm 0.6) \times 10^{-5}$ Pa, 可见光压实验值在数量级上较为合理.

另外, 若是传统扭秤实验, 未利用机械共振驱动, 则平衡时 $k\theta = Fd$, 得 $\theta = 2.3 \times 10^{-4}$ rad. 与表 1 中 A_{\max} 值相比, 小 20~30 倍. 可见在相同光压大小作用下, 共振扭秤比传统扭秤有更大偏转, 对弱力有更好的放大.

4 结束语

将机械共振、光杠杆和电磁阻尼等引入扭秤装置中, 设计了光压的测量方案. 给出了该方案的理论分析, 并搭建了实验装置进行验证, 结果表明该方法可实现对光压现象的演示及测量. 该方案有别于传统的光干涉、扭秤偏转和压电陶瓷光电转换等光压测量方法, 在大气环境中, 测量光对镜片的平行分力, 忽略垂直镜片的分力, 从而将光

压与辐射效应错开, 并采用机械工作、频谱分析等方式抑制环境噪声的干扰, 实现对光压信号的准确提取.

参考文献:

- [1] Maxwell J C. A dynamical theory of the electromagnetic field [M]. Eugene: Wipf and Stock Publishers, 1996:92-94.
- [2] Maxwell J C. A treatise on electricity and magnetism [M]. Oxford: Oxford University Press, 1837: 150-155.
- [3] 胡滨, 陈杰, 潘玮, 等. 真伪“光压风车”之辨析[J]. 物理通报, 2011, 40(8): 84-86.
- [4] 郑华熾. II. H. 列别捷夫的光压实验[J]. 物理通报, 1956(3): 22-25.
- [5] Lebedev P N. Experimental examination of light pressure [J]. Nuovo Cimento, 1883, 15(195): 195.
- [6] 丁健生. 用两次曝光全息干涉法演示光压作用[J]. 教学仪器与实验, 1987(4): 20-22.
- [7] 崔金松, 李成仁, 刘玉凤. 光压观测仪的研制[J]. 物理实验, 1999, 19(1): 29-30.
- [8] 赵静, 林鸿湘, 邱棠, 等. 基于马赫曾德干涉光路的光压测量装置设计[J]. 光子学报, 2016, 45(6): 0612002-1-7.
- [9] 涂良成, 黎卿, 邵成刚, 等. 万有引力常数 G 的精确测量[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41(6): 691-705.
- [10] 涂良成, 杨山清, 黎卿, 等. 精密扭秤实验技术及其应用[J]. 科学通报, 2014, 59(31): 2999-3008.
- [11] 陈应天, 张学荣, 李建国, 等. 用机械共振法测引力常数 G [J]. 华中理工大学学报, 1989, 17(3): 155-158.
- [12] 林曼虹, 黄培灿, 林瑞丰, 等. 利用精密扭秤测量微小电量[J]. 大学物理实验, 2015, 28(1): 29-31.
- [13] 范启通. 基于高 Q 值扭秤检验弱等效原理实验的前期研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [14] 唐九耀, 张晓华. 一维位置敏感探测器位置准确度和线性度的改进[J]. 光学学报, 2005, 25(11): 1501-1505.
- [15] 杨应平, 陈梦苇, 贾信庭. 四象限光电探测器实验装置的研究与应用[J]. 物理实验, 2014, 34(5): 29-32, 39.
- [16] 黄梅珍. 位置敏感探测器的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.

(下转第 12 页)

Simulating the Dirac comb with a string chain system

LIU Shang, YAO Wen-jie, XUN Kun

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The Dirac comb was simulated using a string chain system. The classical mechanical vibration of this one-dimensional string chain and the electron wave function in a one-dimensional periodic potential had equivalent eigenvalue equations and their eigen-spectra should share the same properties, such as the existence of band structure. The eigen-spectrum distribution of the string chain system was studied by experiment as well as numerical computation, and the results from those two methods did not coincide with each other. Such discrepancy might come from the nonzero mass of the associated strings, the elasticity of the main string and the non-vanishing area of the touching points between the main string and associated strings. By introducing suitable corrections, numerical results finally recovered the experimental ones.

Key words: Dirac comb; string chain system; dynamical simulation

[责任编辑:任德香]

(上接第 6 页)

Measuring light pressure based on mechanical resonance

LIU Ze-gang¹, HUANG Geng-shi¹, LI Zhen-zhu¹, WU Ze-hong¹,

LIN Mei-yu¹, WU Yong-bo^{1,2,3}, TANG Zhi-lie^{1,2,3}

(1. School of Physics and Telecommunication Engineering,
South China Normal University, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Research Center of Photoelectric Detection Instrument
Engineering Technology, Guangzhou 510006, China;

3. Guangdong Laboratory of Quantum Engineering and
Quantum Materials, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Based on torsion balance, combining with mechanical resonance, optical lever and electromagnetic damping, a measurement method of light pressure was put forward. Optical parallel force towards lens was measured and the vertical force was omitted in the atmospheric environment, which would stagger light pressure and radiation effect, not requiring vacuum conditions. The controlled laser drove the torsion balance to resonate. By measuring the amplitude of the torsion balance, the light pressure could be obtained. Experimental results showed that the light pressure was about 4.2×10^{-5} Pa when the incidence angle was 45° and the power was about 70 mW. The spectrum analysis of the resonance curve and the assessment of pressure measurement result confirmed the feasibility of the method.

Key words: light pressure; mechanical resonance; torsion balance; Crookes radiation effect

[责任编辑:任德香]